

УДК 535.55

## ПАССИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ МЕЗОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

В.И. Фесенко<sup>1</sup>, С.Н. Шульга<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, лаб. «Фотоника», Харьков 61166, пр. Ленина, 14.

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, каф. теор. радиофизики, 61077, пл. Свободы, 4.

Поступила в редакцию 25 мая 2010 г.

В настоящее время, в оптических цепях, находят широкое применение два типа преобразователей поляризации: активные и пассивные. В данной работе предложен, и исследован, пассивный преобразователь поляризации ближнего ИК-диапазона. Структура, на базе мезопористого кремния, представляет собой  $N$  распределенных Брэгговских отражателей (РБО), разделенных между собой  $N-1$  дефектами. При теоретическом моделировании был использован метод скаляризации электромагнитного поля в комплексе с методом конечных разностей. Представлены спектральные характеристики предложенного конвертера поляризации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** преобразователь поляризации, Брэгговский отражатель, анизотропия

На сьогодні, в оптичних колах, знаходять широке застосування два типи конвертерів поляризації: активні та пасивні. В даній роботі запропоновано та досліджено пасивний конвертер поляризації ближнього ІЧ-діапазону. Структура, на основі мезопористого кремнію, являє собою  $N$  розподілених Брегівських відбивачів (РБВ), розділених між собою  $N-1$  дефектами. При теоретичному моделюванні було використано метод скаляризації електромагнітного поля в комплексі з методом скінчених різниць. Наведено спектральні характеристики запропонованого конвертеру поляризації.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** конвертер поляризації, Брегівська решітка, анізотропія

Today, there are two fundamental type polarization converters, passive and active, are widely used in optical circuits. In this paper, we present a passive polarization converter for near infrared range. The converter reported here is porous silicon-based structure consists of  $N$  distributed Bragg reflectors (DBR) separated by  $N-1$  defects. The method of the electromagnetic field's scalarization and finite difference technique were used for calculation of spectral characteristics. The transmittance spectra of the proposed polarization converters for the both polarization of the incident plane wave are presented

**KEY WORDS:** polarization converter, Bragg reflector, anisotropy

Во многих практических приложениях, возникает необходимость в контроле и управлении поляризацией излучения, распространяющегося в устройствах оптического диапазона, что обусловлено ухудшением работы систем из-за поляризационно-зависимых эффектов. Данная задача может быть решена двумя путями: первый – использование поляризационно-независимых устройств; второй – использование устройств позволяющих управлять поляризацией распространяющегося излучения, например преобразователей поляризации.

В настоящее время, преобразователи поляризации находят широкое применение во многих приложениях, как микроволнового [1], так и оптического диапазонов [2]. Следует отметить, что для управления поляризацией излучения, в равной степени, используются как активные, так и пассивные устройства. Выбор того или иного типа устройств обусловлен решаемыми им задачами, а также в немалой степени его стоимостью.

Первая статья, посвященная пассивным преобразователям поляризации для оптического диапазона, была опубликована в 1991 г. [2]. С тех пор был предложен целый ряд пассивных и активных устройств, позволяющих управлять поляризацией распространяющегося излучения [3] - [4].

Следует отметить, что в основе работы всех ранее предложенных устройств лежат два принципа: первый – использование асимметричной решетки в решеточных ответвителях [3]; 2) второй – использование диэлектрических волноводов, в которых могут распространяться гибридные моды [4].

Оба типа преобразователей поляризации имеют как свои преимущества, так и недостатки. Преимуществом активных устройств является возможность управления эффективностью преобразования поляризации, путем управления величиной мощности распространяющегося излучения. Однако использование большинства, из существующих, активных преобразователей ограничено необходимостью применения материалов с ярко выраженным электрооптическим либо акустооптическим эффектом, что существенно увеличивает стоимость устройств.

В случае использования акустооптических материалов, еще одним препятствием, является необходимость в использовании дополнительных контролируемых электронных устройств.

В противоположность активным устройствам, пассивные преобразователи, имеют меньше ограничений по отношению к используемым материалам, а также более дешевую и простую технологию изготовления. В случае возникновения необходимости в перестройке по длине волны, может быть задействован термооптический эффект, который в противоположность электрооптическому и акустооптическому эффектам не требует использования дорогостоящих материалов или технологий.

Конвертер поляризации, предлагаемый в данной статье, представляет собой распределенный Брегговский отражатель с несколькими дефектами в периодической решетке. В качестве исходного материала предлагается использование пористого кремния (ПК), что обусловлено его специфическими свойствами в оптическом диапазоне. Авторами работы [5], было продемонстрировано, что слои мезопористого кремния, с размерами пор приблизительно 10 – 30 нм, созданные на подложке монокристаллического кремния с низкой симметрией поверхности обладают свойствами отрицательного одноосного кристалла с величиной двулучепреломления  $\Delta n = n_o - n_e$  вплоть до 0,24 (здесь  $n_o$  и  $n_e$  – показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей, соответственно). Как следует из результатов данной работы, величина наведенного двулучепреломления зависит от пористости материала. Увеличение пористости сопровождается уменьшением эффективных показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн и увеличением их разности, что в свою очередь приводит к возрастанию величины двулучепреломления. Таким образом, мезопористый кремний характеризуется значительной величиной анизотропии показателей преломления, что в свою очередь оказывает существенное влияние на оптические характеристики устройств на его основе, и предопределяет широкие перспективы его использования в устройствах интегральной оптики.

В качестве результата численного моделирования приведены спектральные характеристики исследуемых конвертеров поляризации.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследуемая структура (рис. 1) состоит из  $N$  распределенных Брегговских отражателей разделенных

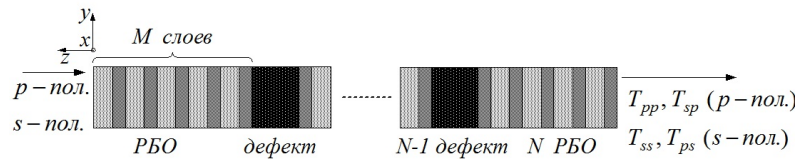


Рис. 1. Исследуемая структура.

между собой  $N-1$  дефектами, представляющими собой нарушение в периодичности структуры.

Произвольный РБО состоит из  $M$  слоев мезопористого кремния. Будем считать, что в пределах каждого слоя анизотропный материал является

одноосным с произвольной ориентацией оптической оси. Физическая толщина слоев в РБО выбрана таким образом, чтобы их оптическая толщина была равной  $\lambda_B/4$ , где  $\lambda_B$  – Брегговская длина волны, соответствующая центру фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) при нормальном падении излучения на структуру. Дефектные слои, сформированы слоями пористого кремния, с оптической толщиной равной  $\lambda_B$ .

В произвольной точке, исследуемой структуры, магнитная проницаемость является постоянной  $\mu_j = 1$ , а диэлектрическая проницаемость материала определяется следующим образом:

$$\hat{\varepsilon}(z) = \varepsilon_{\perp}(z) \hat{I} + (\varepsilon_{\parallel}(z) - \varepsilon_{\perp}(z)) \vec{a} \vec{a}, \quad (1)$$

$$\vec{a} \equiv \vec{a}(z) = (\cos \theta_a \sin \phi_a, \cos \theta_a \cos \phi_a, \sin \theta_a),$$

где  $\hat{I}$  – единичная диада;  $\vec{a}$  – единичный вектор в направлении оптической оси. Для ясности, угол скольжения  $\theta_a$  и азимутальный угол  $\phi_a$ , определяющие направление оптической оси в произвольном слое, показаны на рис. 2 при этом:  $-\pi/2 \leq \theta_a \leq \pi/2$ ,  $0 \leq \phi_a \leq 2\pi$ .

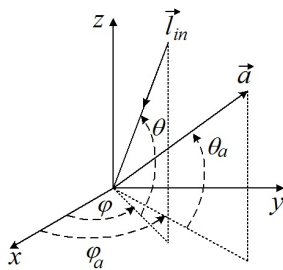


Рис. 2. Ориентация векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{l}_{in}$ .

Также считаем, что падающая ( $s$  или  $p$  поляризованная) плоская волна приходит из свободного полупространства  $z > 0$  в направлении единичного вектора  $\vec{l}_{in}$ , которое определяется углом скольжения  $\theta$  и азимутальным углом  $\varphi$  (см. рис. 2):

$$\vec{l}_{in} = (\cos \theta \sin \varphi, \cos \theta \cos \varphi, -\sin \theta), \quad -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (2)$$

При теоретическом моделировании был использован метод скаляризации электромагнитного поля в комплексе с методом конечных разностей, детально описанный в предыдущих работах авторов (см. например [6]). В результате была получена система линейных алгебраических уравнений, решением которой являются искомые коэффициенты прохождения и отражения для исследуемой структуры.

Для случая  $s$ - поляризованной падающей волны, данная система принимает следующий вид:

$$\begin{cases} x_n(1 - ik_0 b \lambda_{ss}^{(a)}) - x_{n-1} - ik_0 b \lambda_{sp}^{(a)} y_n = f_{ss}, \\ -ik_0 b \lambda_{ps}^{(a)} x_n + y_n(1 - ik_0 b \lambda_{pp}^{(a)}) - y_{n-1} = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_j x_{j+1} + B_j x_j + C_j x_{j-1} + D_j y_{j+1} + F_j y_j + G_j y_{j-1} = 0, \\ P_j x_{j+1} + Q_j x_j + R_j x_{j-1} - K_j y_{j+1} - L_j y_j - M_j y_{j-1} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$\begin{cases} x_1 - x_0(1 + ik_0 b \lambda_{ss}^{(u)}) - ik_0 b \lambda_{sp}^{(u)} y_0 = f_{ss}, \\ y_1 - y_0(1 + ik_0 b \lambda_{ps}^{(u)}) - ik_0 b \lambda_{pp}^{(u)} y_0 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

В (3)–(5) использованы следующие обозначения:  $k_0$  – волновое число в вакууме;  $b$  – толщина микроструктуры;  $n$  – количество разбиений структуры;  $x_0, \dots, y_n$  – неизвестные,  $A_j, \dots, M_j, f_{ss}, \lambda_{ss}^{(a)}, \dots, \lambda_{pp}^{(u)}$  – комплексные величины, зависящие от:  $k_0, b, \hat{\varepsilon}(z), \mu_j, \theta_a, \varphi_a, \theta, \varphi$ . В явном виде данные величины можно найти в работе [6]. Для  $p$ - поляризации система уравнений имеет вид подобный (3)–(5).

Неизвестные коэффициенты прохождения и отражения получаем из системы (3)–(5) следующим образом:

$$p \text{ поляризация: } R_{pp} = y_n - 1, R_{sp} = x_n, T_{pp} = y_0, T_{sp} = x_0. \quad (6)$$

$$s \text{ поляризация: } R_{ss} = x_n - 1, R_{ps} = y_n, T_{ss} = x_0, T_{ps} = y_0. \quad (7)$$

В формулах (6), (7) использованы комплексные коэффициенты отражения  $R_{v\xi}$  и прохождения  $T_{v\xi}$  ( $v, \xi = p, s$ ), которые в общем случае зависят от частоты падающего излучения, углов  $\theta$  и  $\varphi$ , а также прочих геометрических параметров задачи. Коэффициенты с совпадающими индексами ( $v = \xi$ ) описывают преобразование падающей волны в волну с той же поляризацией, а коэффициенты с разноименными индексами ( $v \neq \xi$ ) – в волну ортогональной поляризации. В такой записи  $R_{v\xi}, T_{v\xi}$  левый индекс  $v$  отвечает отраженной или прошедшей волне, а правый  $\xi$  – падающей.

### ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной части работы приведены результаты численного моделирования, иллюстрирующее влияние анизотропии материала слоев, на преобразование поляризации плоской линейно поляризованной электромагнитной волны, при прохождении сквозь исследуемую плоскоструктурную структуру.

Для численных расчетов были использованы структуры, состоящие из слоев пористого кремния с высокой (43%) и низкой (62%) пористостями, что отвечает эффективным показателям преломления  $n_{01} = \sqrt{\varepsilon_{1\perp}} = 2,24$  и  $n_{02} = \sqrt{\varepsilon_{2\perp}} = 1,5$ . Величины анизотропии показателей преломления, в окрестности  $\lambda_B$ , для данного случая, составляют  $\Delta n_1 = n_{01} - n_{e1} = 0,052$  и  $\Delta n_2 = n_{02} - n_{e2} = 0,139$ , соответственно [5]. В такой записи  $n_{0j}$  and  $n_{ej}$  - представляют собой показатели преломления для «обыкновенной» и «необыкновенной» волн в пределах  $j$ -го слоя структуры. Дефектные слои сформированы пористым кремнием с пористостью 62%. В исследуемом случае  $\lambda_B = 1550$  нм.

Вначале были изучены особенности дифракции падающей плоской линейно поляризованной волны, при различных значениях углов  $\theta_a, \theta, \varphi_a, \varphi$  (см. рис. 2).

Соответствующие угловые зависимости коэффициентов прохождения  $T_{pp}, T_{ss}, T_{sp}, T_{ps}$ , для двух поляризаций падающей волны, представлены на рис. 3 – 5.

Рис.3 отображает эффективность преобразования падающей  $s$ - или  $p$ - поляризованной волны в волну ортогональной поляризации, как функцию угла падения ( $\theta$ ) излучения на структуру. Как следует из данной зависимости, наиболее эффективное преобразование поляризации соответствует диапазону углов падения:  $80^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ .

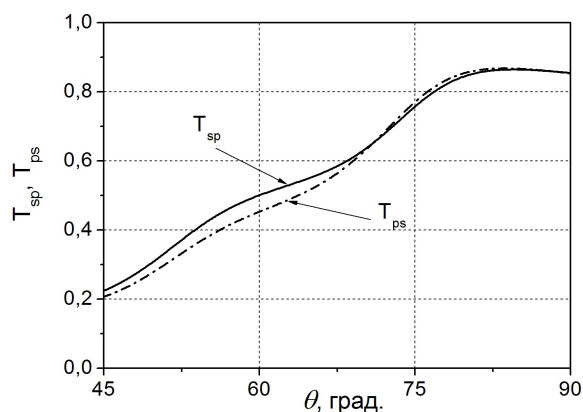


Рис. 3. Зависимость коэффициентов прохождения  $T_{sp}, T_{ps}$  от угла  $\theta$ . В данном случае  $\theta_a = \varphi_a = 45^\circ$ .

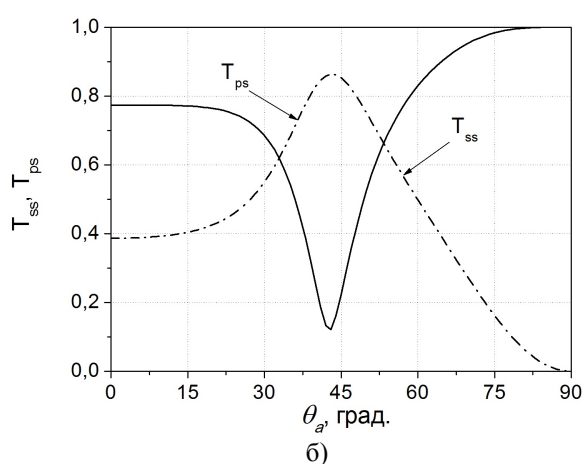
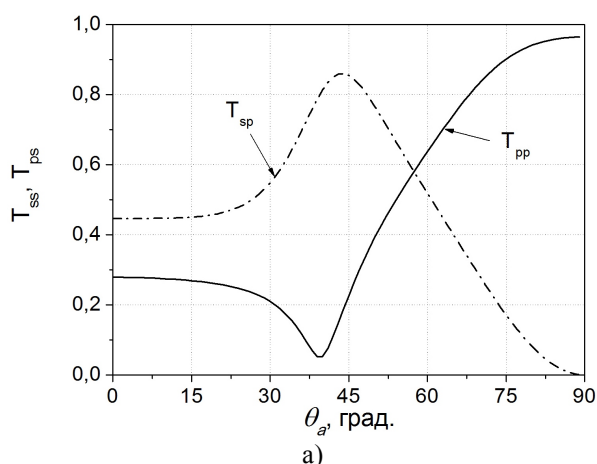


Рис. 4. Коэффициенты прохождения  $T_{pp}, T_{ss}, T_{sp}, T_{ps}$ , как функция угла наклона  $\theta_a$  оптической оси в слоях. а) случай р-поляризованной падающей волны; б) s-поляризованной.

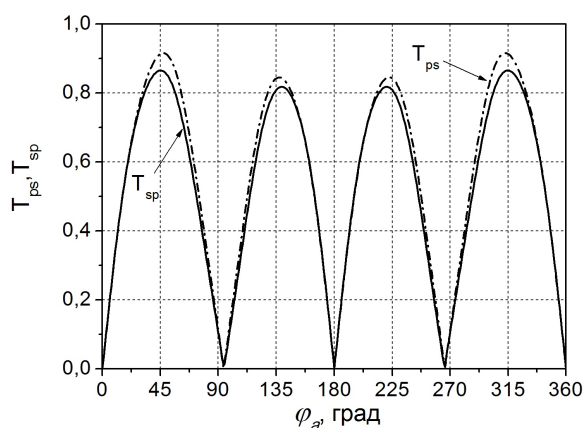


Рис. 5. Зависимость коэффициентов  $T_{sp}, T_{ps}$  от азимутального угла  $\varphi_a$ .

направление оптической оси в слоях структуры, которые соответствуют максимально эффективному преобразованию поляризации s- или р- поляризованной падающей волны, в волну ортогональной поляризации.

Рис.6 содержит спектральные характеристики исследуемых структур (с разным количеством дефектов), для случая р-поляризованного падающего излучения. Спектральные зависимости для s-поляризации имеют подобный вид, и поэтому не приводятся. Для расчетов были взяты следующие значения:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\theta_a = \varphi_a = 45^\circ$ . Количество слоев в каждом из РБО  $M = 10$ .

На рис.4 представлены подобные зависимости, но для разных значений угла скольжения  $\theta_a$ . При расчетах, использованы следующие значения:  $\varphi_a = 45^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ . Результаты моделирования иллюстрируют наличие максимума в преобразовании поляризации, при наклоне оптической оси в слоях около  $45^\circ$  по отношению к нормали.

Рис.5 демонстрирует зависимость коэффициентов прохождения  $T_{sp}, T_{ps}$  от азимутального угла  $\varphi_a$ , определяющего положение оптической оси в слоях структуры. При расчетах использованы следующие значения:  $\varphi = 0^\circ, \theta = 90^\circ, \theta_a = 45^\circ$ .

Анализируя зависимости, представленные на рис.5, можно сделать следующие выводы:

– в случае, когда  $\varphi_a \approx m \cdot \pi/2$ , ( $m = 0, 1, 2, 3, 4$ ) преобразование падающей волны в волну ортогональной поляризации отсутствует; в промежутках между данными значениями имеет место преобразование поляризации падающего излучения как в волну с той же поляризацией, так и в волну с ортогональной поляризацией, причем максимум преобразования соответствует углам  $\varphi_a \approx m \cdot \pi/4$ , ( $m = 0, 1, 2, 3, 4$ ).

Таким образом, проведенный предварительный анализ, дает возможность определить значения углов падения излучения на структуру, а также углов, определяющих

Рис.6(а) относится к структуре с одним дефектом, на рис.6(б) приведены коэффициенты

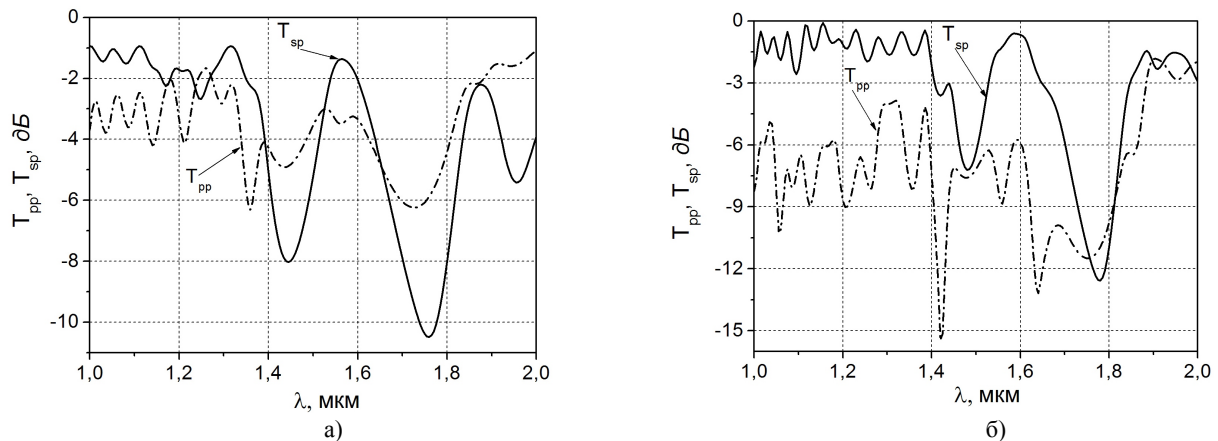


Рис. 6. Спектральные характеристики исследуемой структуры: а) с одним дефектом; б) с двумя дефектами.

прохождения для основной и ортогональной поляризации для структуры с двумя дефектами.

Как следует из графических зависимостей, во всех случаях, присутствует фотонная запрещенная зона с полосой пропускания для излучения ортогональной поляризации, в окрестностях Брэгговской длины волны. В свою очередь, в окрестностях  $\lambda_B$ , коэффициент пропускания для исходной поляризации имеет локальный минимум, величина которого зависит от количества дефектов в структуре. Наблюдаемый эффект, объясняется проявлением двулучепреломления, и может быть использован для преобразования поляризации распространяющегося, в структуре, излучения. В случае необходимости получения более узкой и глубокой ФЗЗ, а также более узкого пика пропускания, необходимо либо увеличить количество слоев в каждом РБО, либо использовать структуру с большим контрастом показателей преломления соседних слоев в РБО [7].

Расчеты, проведенные для разного количества дефектных слоев, указывают на то, что оптимальное соотношение между коэффициентами пропускания для излучения исходной поляризации и для ортогонально поляризованного излучения, может быть получено при использовании структуры с двумя дефектными слоями.

### ВЫВОДЫ

В работе предложен и исследован пассивный преобразователь поляризации ближнего ИК-диапазона. В качестве материала предложено использовать мезопористый кремний, который характеризуется значительной величиной двулучепреломления в ближнем ИК-диапазоне [5], благодаря чему открывается возможность манипуляции поляризацией падающего на структуру излучения.

Даны рекомендации по выбору параметров структуры, для получения наиболее эффективного преобразования поляризации распространяющегося в ней излучения.

Полученные результаты, могут быть использованы при проектировании устройств интегральной оптики на основе мезопористого кремния.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T.-Y. Huang, Y.-C. Yu, R.-B. Wu, Dual-band/Broadband Circular Polarizers Designed with Cascaded Dielectric Septum Loadings // Progress In Electromagnetics Research Symposium 2006, Cambridge, USA, March 26-29
2. Y. Shani, R. Alferness, T. Koch, U. Koren, M. Oron, B. I. Miller, and M. G. Young, Polarization Rotation in Asymmetric Periodic Loaded Ribwaveguides // Appl. Phys. Lett.–Vol. 11.– PP. 1278–1280, 1991.
3. V. P. Tzolov and M. Fontaine, A Passive Polarization Converter Free of Longitudinally-Periodic Structure // Opt. Comm., 4. vol. 127.– PP. 7–13, 1996.
5. T. Lang, F. Bahnmüller, and P. Benech, New Passive Polarization Converter On Glass Substrate // IEEE Photon. Technol. Let.– Vol. 10.– PP.1295–1297, 1998.D. Kovalev, G. Polisski, J. Diener, H. Heckler, N. Künzner, V. Yu. Timoshenko, and F. Koch. Strong In-plane Birefringence of Spatially Nanostructured Silicon // Applied Physics Letters, Vol. 78.– p. 916, 2001.
6. S.N. Shulga and other. Calculation of the Coefficients of Reflection and Transmission of a Plane Electromagnetic Wave for an Inhomogeneous Gyrotropic Layer by the Finite-Difference Method // Journal of Communications Technology and Electronics.– Vol. 45, No. 6.– PP. 662 – 669, 2000.
7. Herbert Venghaus, Wavelength Filters in Fibre Optics// Springer. Berlin 2006, 454p.